

원심모형실험을 이용한 주문진 표준사 지반내 알루미늄 모형 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구

김택곤¹⁾ · 김영근²⁾ · 박중배²⁾ · 이희근³⁾

Analysis of the Structural Behaviors of Aluminum Tunnel Lining in Joomunjin Standard Soil by Centrifugal Model Tests

Taek-Kon Kim, Young-Geun Kim, Joong-Bae Park and Hi-Keun Lee

ABSTRACT It is very important to study on the structural behaviors of structurally damaged tunnel linings. A series of centrifuge model tests were performed in order to investigate different behaviors of tunnel linings. A 1/100-scaled aluminum horseshoe tunnel linings with a radius 5 cm, height 8 cm were buried in a depth with dry Joomunjin standard sand, the relative density of which was 86%. Such sectional forces as bending moments and thrusts along the tunnel circumference were measured by twelve strain gages. Earth pressures in soil mass and on the outside of lining model were estimated by pressure transducers, ground surface settlements at a center and edges by using LVDTs.

Key words : Centrifugal model test, Tunnel lining, Bending moment, Thrust, Earth pressure.

초 록 최근 들어 노후화 터널 및 시공불량의 원인으로 결함이 발생하여 시공이후에 라이닝이 제기능을 발휘하지 못하여 보수, 보강, 심지어 재시공되는 사례가 발생하고 있어 이에 대한 역학적 거동 분석의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 100G(G: 중력가속도)까지의 원심모형실험(centrifuge)을 실시하여 몇몇 라이닝들의 역학적 거동을 분석하였다. 이를 위해 강사기(sand rainer)를 이용하여 평균적으로 상대밀도 86% 주문진 표준사 지반을 작성하였으며, 이 때 평균 정지토압계수는 평균 0.39로 나타났다. 원심모형실험의 토피 대 터널 높이비는 3으로 설정하였으며, 라이닝 재료로서 알루미늄을 이용하여, 천단부 및 어깨부 배면공동, 천단두께부족, 무인버트, 측벽결함 라이닝을 제작하여, 각종 센서로부터 라이닝 원주변형률, 휨모멘트, 축력, 라이닝토압, 지중토압, 지표침하를 측정 및 분석하였다.

핵심어 : 원심모형실험, 터널 라이닝, 휨모멘트, 축력, 토압

1. 서 론

NATM 터널공법에서는 콘크리트 라이닝은 숏크리트, 록볼트와 같은 1차 지보와 달리 2차 지보재로서 지반하중을 직접 받지 않는 개념으로 설계하고 있다. 그러나 숏크리트 등으로 형성된 지보재가 충분한 안전율이 없는 경우 숏크리트에 균열이 발생하여 지반응력이 콘크리트 라이닝에 전달될 수 있고, 지반 변위가 수렴하기 이전에 콘크리트 라이닝을 시공하거나, 토피가 작은 토사지반에서는 상재하중을 반영한 라이닝의 역학적 검토가 필요하다고 제시하고 있다¹⁾. 이와 같이 부실 시공이나 설계단계에서 고려하지 못한 터널 주변환경의 변화로 인해 지반 이완에 의한 연직압, 소성압, 편압 등이 추가적인 하중으로 2차 라이닝에 작용할 수 있으나 이에 대한 라이닝의 역학적

거동에 관해서는 거의 알려진 바가 없다. 이를 해결하기 위해 실제 터널을 대상으로 연구를 수행할 수도 있으나 비경제적인 소지를 안고 있는 경우, 축소율을 적용한 모형실험으로 대체해야 한다. 그러나 지반 및 암반공학 분야에서는 소형화 및 단순화의 필요성이 있음에도 실제 거동을 그대로 재현하는데는 많은 어려움이 따른다. 이는 지반 및 암반공학분야에서는 대개가 자중(self-weight)과 관련된 문제들이 많고, 자중에 의한 구속압이 지반거동을 지배하기 때문에 1g 하에서의 축소모형은 소형화로 인한 자중감소로 인해 실물과 같은 역학적 구조상태를 파악하

- 1) 정회원, 대본엔지니어링 지반부
 - 2) 정회원, (주)대우 건설기술연구소 토목연구실 과장
 - 3) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
- 원고 접수일 : 1999년 2월 16일
원고 심사 완료일 : 1999년 5월 3일

기가 쉽지 않은데 있다. 지반공학분야에서 이를 어느 정도 해결해 주는 것이 원심모형실험(centrifugal model test)이다.

본 연구에서는 원심모형실험을 실시하여 토피고가 터널 높이의 3배에 구축된 구조적 결합 터널 라이닝의 역학적 거동을 분석하였다. 터널 라이닝은 표준형을 비롯하여 1/100로 축소된 천단부 및 어깨부 배면공동, 천단두께부족, 무인버트, 측벽결합 모형으로 나누었다. 축소된 라이닝 재료로는 알루미늄을 사용하였는데, 이는 크기효과에 따른 라이닝의 파괴를 방지하여 순수한 지반자중에 의한 구조적 결합 라이닝의 역학적 거동을 분석하기 위함이다. 라이닝이 구축될 대상지반은 동일하고 균일한 상대밀도에 의한 자중조건을 유지하기 위하여 주문진 표준사를 사용하였다. 본 연구에서는 라이닝 설치의 시간적 효과, 발파나 지진에 의한 동역학적거동, 지하수조건 등은 고려하지 않았으며, 정성적으로 분석하였다.

2. 터널 원심모형실험법

2.1 개요

원심모형실험이란 1/n로 축소된 모형에 원심력에 의한 인위적인 가속도 n-G 장을 부여하여 모형내부에 실제 지반과 동일한 응력 상태를 재현할 수 있는 시험기법이다(Fig. 1). 그러나 소규모 원심모형실험에서 모든 지반 공학적 거동을 상세히 분석하기 위해서는 그에 동반한 초소형, 고정밀도, 내구성이 뛰어난 계측장비가 필요하며 이는 현재의 기술 수준과 맞물려 있다. 터널 원심모형실험도 예외는 아니어서 터널 굴착 및 라이닝 설치과정을

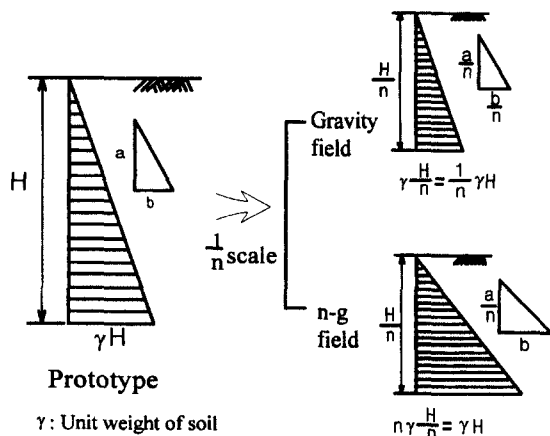


Fig. 1. Modeling under artificial gravity field.

원심모형실험에서 재현한다는 것은 현 기술단계로는 많은 제약조건이 따른다. 또한, 모형실험의 특성상 모든 지반공학적 관심사들을 그대로 재현하는 것은 불가능하기 때문에 공학적인 관점에서 가치가 있는 중요 특성(key features)들만을 허용할 수 있도록 근사시켜야 한다.

원심모형실험을 터널에 적용한 사례는 크게 터널이나 막장 유지를 위한 지보압 산정, 실드(shield) 터널의 진입으로 인한 인접 터널영향, 터널변형으로 인한 지표침하 등이 주를 이루어왔다^{2,6)}. 터널 라이닝 모형재료로는 고무 멤브레인이나, 제작의 간편성, 정밀한 변형률, 지반과 유사한 밀도 등의 이유로 원형 알루미늄관이 주를 이루며, 점토석고 혼합물을 원형으로 제작한 예도 있다⁷⁾.

일반적으로 터널의 3차원적 거동으로 인하여 터널 상부 지반 중 일부가 터널 라이닝에 작용하는 것으로 알려져 있다. 모든 터널에서 발생하는 이러한 현상은 초기응력이 지반의 연속성과 고유 전단강도에 의해 공동주변에 재분배되는 것으로서 흔히 아칭효과(arching effect)라 한다. 이론적으로 라이닝은 인접지반으로 아칭되지 않는 하중만을 지보하면 되는 것으로서 이에 대한 많은 추정을 하고 있는 실정이다⁸⁾. 그러나 이와 같은 사실에도 불구하고 얇은 터널(토피가 터널 높이의 3배 이하)에서 응력감소계수라는 개념을 반드시 도입할 필요는 없다^{9,10)}. 왜냐하면 아칭현상이 지반의 얇은 토피 때문에 완전히 발전되지 않을 수 있고, 소성영역이 지표면까지 확장될 수 있기 때문에 터널 상부의 전체 지반 자중의 영향을 직접 받을 수 있다. 물론 굴착에 의한 아칭현상이 발전될 경우 예측된 라이닝 하중이 너무 보수적일 수도 있다. 하지만 얇은 지반의 거동은 다소 모호하고 실용적인 최소두께로 계산되기 때문에 보수적인 평가가 문제를 일으키진 않을 것으로 생각하며, 실험의 성격상 굴착효과를 고려하지 못한 원심모형실험을 실시하였다.

2.2 실험 장비 및 계속

2.2.1 원심재하기(centrifuge)

일반적으로 원심재하기(이하 centrifuge)는 크게 beam 형과 drum 형으로 나눌 수 있으나, 현재 지반공학에 이용되고 있는 대부분은 beam 형으로 단일 바스켓형(single basket type)이다. 본 연구에서 사용한 원심재하기는 프랑스의 ACTIDYN SA가 1년간의 기간을 통해 제작한 최대 200G-ton급이며(Fig. 2) 현재 (주)대우건설기술연구소에서 소유하고 있다¹¹⁾.

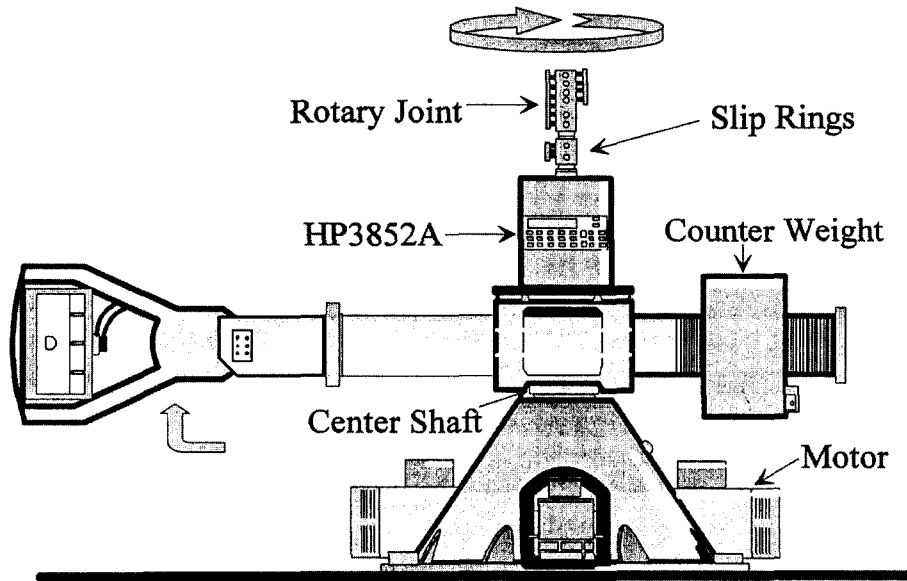


Fig. 2. 200G-ton geotechnical centrifuge.

2.2.2 알루미늄 라이닝 모형제작

본 실험에서는 원심모형실험의 축소율 및 모형심도를 고려하여 얇은 심도에 위치한 도심지 터널을 대표단면으로 설정하였으며, 슛크리트 라이닝 및 콘크리트 라이닝의 복층 라이닝을 동시에 고려하지 않고 두께가 50 cm 인 단일 라이닝으로 고려하였다. 일반적으로 알루미늄은 취성 물질인 콘크리트와 특성이 다른 재료이지만 터널 원심모형실험에서 라이닝 재료로 많이 사용되고 있는데 이는 알루미늄 특성상 얇은 두께로 제작이 용이하며, 밀도가 콘크리트와 큰 차이가 나지 않고, 탄성구간에서는 변형이 용이하게 일어나 역학적 거동 검토에 적합하기 때문으로 생각된다. 그러나 취성재료의 항복점 이후 및 파괴의 특성을 볼 수 없다는 단점이 있다. 또한 기본적으로 알루미늄은 콘크리트와 물리적 성질이 다르기 때문에 콘크리트 라이닝 두께 50 cm를 그대로 1/100로 축소하여 사용하기엔 무리가 따른다. 특히 라이닝의 중요한 설계변수인 축력과 휨모멘트를 계산할 때 요구되는 재료의 탄성계수에 따라 계산된 값이 다르게 되므로, 콘크리트 라이닝을 알루미늄으로 재현하는데 있어 등가의 두께로 수정해야 한다.

터널 라이닝의 강성(stiffness) EI는 (1)식의 관계를 가진다. 여기서 첨자 m은 모형(model), p는 실물(proto-type), n은 축소율을 나타낸다.

$$E_m I_m = \frac{E_p I_p}{n^4} \tag{1}$$

여기서 I는 부재의 2차 단면모멘트로서 4의 차원을 가진다.

$$I = \frac{bt^3}{12} \tag{2}$$

단, b: 부재의 폭, t는 부재의 두께

2차원 상에서 부재의 폭 b는 단위길이를 고려하므로 모형실험에서 단면모멘트 I는 3의 차원이 된다. 따라서 (1)식을 이용하면 라이닝을 1/n 축척으로 축소했을 경우 모형의 라이닝 두께가 산정 된다. 그런데 모형과 실물의 탄성계수가 다르므로 이에 해당되는 탄성계수의 비를 X라 하면 아래와 같다.

$$E_m = X E_p \tag{3}$$

(2)식을 (1)식에 대입하여 정리하고, 이를 (3)식에 의해 나타내면 (4)식과 같은 축소모형 라이닝의 두께를 구할 수 있다.

$$t_m = \frac{t_p}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{X}} \tag{4}$$

따라서, 탄성계수가 약 $1.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 두께 50 cm의 콘크리트 라이닝을 탄성계수가 $7.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 알루미늄을 이용하여 1/100로 축소하면, 알루미늄 라이닝의 두께는 약 3 mm가 된다.

한편 라이닝이 위치할 원심모형실험용 용기(container)의 폭은 198 mm로 설계되어 있다. 알루미늄 라이닝을 용기내부에 설치할 때 몇 가지 유의사항이 있다. 우선 용기 벽면과 라이닝 경계사이의 마찰을 최소화하기 위해 실리콘 오일을 발라야하며 동시에 원심비행중 모래가 라이닝 내부로 유입되는 것을 방지해야 한다. 이를 위해 첫 예비 실험에서 길이 197.8 mm의 알루미늄 라이닝에 얇은 고무 멤브레인을 라이닝 전후로 부착하여 원심모형실험을 실시 결과 40 g 상승단계에서 라이닝과 용기벽면 틈 사이로 모래가 유입되는 실패를 겪었다. 실패 원인이 라이닝과 고무 멤브레인의 틈을 완전히 밀폐하지 못했다는 판단 하에 멤브레인대신 밀봉용 고무를 전후로 부착하였다. 밀봉용 고무는 멤브레인보다 수 mm 더 두껍기 때문에 벽면과의 완전 밀착이 가능하지만, 용기 내부에서 라이닝의 움직임이 원활해야하므로 라이닝의 길이를 축소해야 했다. 이후 몇 번의 예비실험을 통해 최종적인 알루미늄 라이닝의 길이를 195 mm로 정하였다.

2.2.3 계측센서

계측항목은 라이닝 원주변형률, 라이닝 토압, 지중토압, 지표침하로 정하였다. 본 실험에서 사용된 계측기는 원심모형실험용이기 때문에 초소형이면서 동시에 100G에서도 견딜 수 있는 고내구성 제품이다.

라이닝 원주변형률(circumferential strain)은 라이닝 내부 및 외부면에 변형률 게이지(strain gage)를 부착하여 측정하였다. 변형률 게이지는 온도나 재질성질에 민감하므로 섭씨 18~35°C에서 온도 보정이 필요 없고, 알루미늄 재료용인 일본 TML 사의 FLA-1-23을 사용하였다. 변형률 게이지는 반경 10 cm 알루미늄 라이닝 내부 중심에 수작업으로 부착하는데 시간이 많이 소요되고, 용기 뒷면에 게이지 리드선을 유도할 나사공간이 한정되어, 정면을 기준으로 라이닝의 좌측 반단면 내외벽면에만 부착하였다. 대신 좌우 대칭양상을 확인하기 위해 우측벽 스프링라인(springline) 내외에 변형률 게이지 1쌍을 부착하여 알루미늄 라이닝에는 총 12개의 변형률 게이지(S1-S12)를 부착하였다. 이 때 변형률 게이지가 부착된 터널 각 부분의 명칭은 상부에서부터 좌측으로 천단부(crown), 어깨부(shoulder), 스프링라인(springline), 각부(脚部, haunch), 인버트(invert)로 정의하였다.

라이닝 토압(earth pressure on lining)은 라이닝 외벽면에 직접 작용하는 토압으로 정의하며, 원심 모형실험에 사용되는 토압계는 그 크기가 미세할 뿐 아니라 높은 하중에서도 견딜 수 있는 내구성을 요구한다. 이를 위해 일

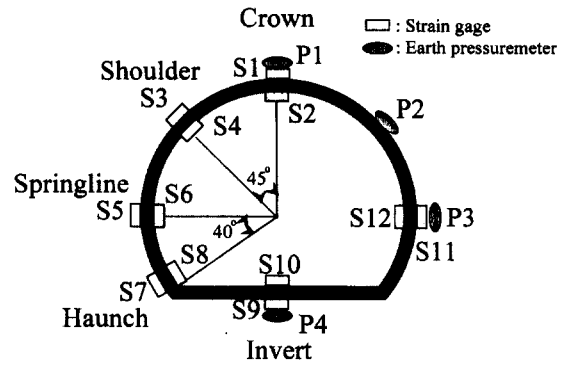


Fig. 3. Location of strain gauges for circumferential strains and earth pressmeters on lining.

본 교와(Kyowa)사에서 제작한 라이닝 토압계(모델명 PS-5KA)를 사용하였으며, 그 크기는 직경 6 mm, 평균두께 0.6 mm로 초소형이다. 라이닝 토압계는 Fig. 3과 같이 변형률 게이지와 겹치지 않게 라이닝 정면을 기준으로 바깥 오른쪽 단면에 4개(P1-P4)를 부착하였다. 그러나 변형률 게이지와 라이닝 토압계는 모두 라이닝에 직접 부착하기 때문에 천단이나 스프링라인 우측 동일한 단면 위치에서는 서로 겹치게 된다. 이를 피하기 위해 변형률 게이지는 라이닝 길이방향의 중심을 기준으로 전방으로 1 cm 앞에, 라이닝 토압계는 후방으로 1 cm 뒤에 위치시켰다. 또한 라이닝 외벽의 변형률 게이지와 토압계의 리드선(lead line)들은 미리 홈을 낸 라이닝 뒤쪽으로 유도하여 라이닝 내부로 들어가게 하였다. 이는 라이닝을 용기내부에 설치할 때 라이닝 종단면이 리드선의 방해 없이 용기 벽면과 밀착시키기 위함이다. 라이닝 내부로 유도된 리드선들은 모두 용기 뒷면의 나사공들을 통해서 빠져나간다.

지중토압(Earth pressure) 측정을 위해 원심모형실험용으로 많이 사용되고 있는 일본 SSK 사의 P310-10을 구입하였다. 지중토압계의 제원은 직경 10 mm, 두께 3 mm의 초소형으로서 10 kg/cm² 정격용량이며 최대 15 kg/cm² 까지 측정이 가능하다. 지중토압계는 수직토압용 2개(Ver1, Ver2), 수평토압용 2개(Hor-1, Hor-2)를 사용하였다. 그 중 1쌍은 강사기(sand rainer)로 작성된 라이닝의 영향이 없는 순수한 지반 자중을 확인하기 위해 스프링라인에서 약 4D(여기서 D는 라이닝 높이)가 되는 지점에 설치하였고, 나머지 1쌍은 0.5D가 되는 위치에 설치하여 라이닝의 변화에 의한 토압을 측정하였다. 지중토압계는 지반작성 후에 설치하면 지반을 교란하여 상대밀도가 달라지기 때문에 지반작성 중에 설치해야 하는 어려움이 있다. 이를 해결하기 위하여 용기를 누어놓고, 지중토압계의

위치에 실과 테이프를 이용하여 지중토압계를 미리 설치한 후, 강사기를 이용하여 지반을 작성하였다. 모래가 쌓이면서 지중토압계를 반쯤 덮으면, 강사기를 잠시 멈추고 가위를 이용하여 실과 테이프를 살짝 끊어준 후 다시 지반을 재작성하여 지중토압계를 지반 내부에 완전히 묻어 설치를 완료하였다. 만일 용기를 세워 지반을 작성하게 되면 라이닝 하부의 지반은 라이닝으로 인해 제대로 쌓이지 않는 데다가 인접지반에서 흘러내리기 때문에 지반의 상대밀도가 균질하지 않게 된다. 용기를 눕힌 상태에서 지반작성이 완성되면, 트리머(trimmer)와 진공청소기를 이용하여 표면을 성형하고, 용기 전면판을 조립한다. 그후 기중기를 이용하여 용기를 세우는데, 이로 인해 지중토압계의 위치가 변할지도 모른다는 의혹이 생겼다. 이를 확인하기 위해 수 차례의 예비 원심모형실험이 끝난 후, 용기가 세워진 상태에서 조심스럽게 모래를 파내어 지중토압계의 위치를 살펴본 결과 원래 위치를 그대로 유지하고 있어, 용기를 눕힌 상태에서 지중토압계를 설치하더라도 거의 문제점이 없음을 알 수 있었다.

지표침하(surface settlement)는 원심모형실험의 특성상

비행 중에 지중 압밀에 의해 발생하는데, 동일한 무게에서 지반의 부피가 감소하기 때문에 상대밀도가 높아진다. 그러나 초기 상대밀도가 높을수록 이러한 영향은 작아지며, 본 실험에서는 1% 미만의 상대밀도 증가를 보였다. 지표침하는 프랑스 Sensorex 사의 LVDT를 이용하였으며, 좌우대칭으로 가정하여 용기의 반단면에 3개(Settle1-3)를 설치하였으며, LVDT가 고속 원심 비행 중

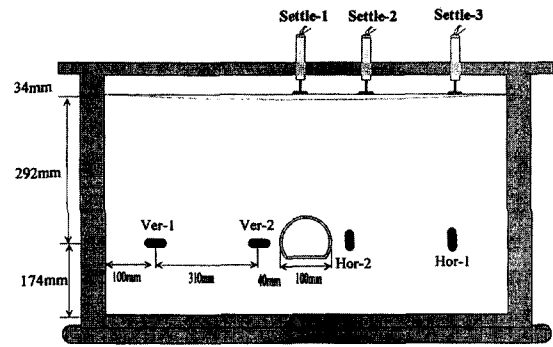


Fig. 4. Location of earth pressuremeters in soil and LVDT for surface settlements.

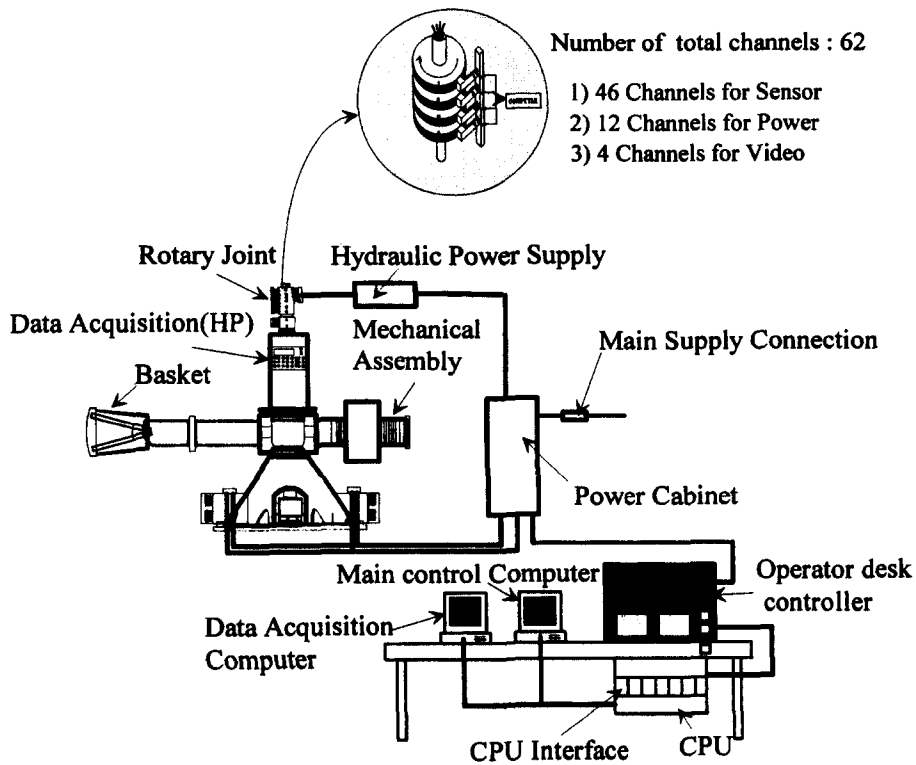


Fig. 5. Schematic view of data acquisition flow.

에 완전히 고정될 수 있도록 LVDT 거치대를 제작하였다. Fig. 4는 설치된 지중토압계와 LVDT의 위치를 나타낸 것이다.

2.2.4 계측계통도

이상의 계측 센서로부터 획득되는 원심재하기의 계측계통은 Fig. 5와 같다. 우선 시료용기 측에 설치된 각종 센서에서 측정된 데이터는 원심재하기에 탑재된 계측 중계대(junction box)에 접속된 후, A/D 변환기를 통하여 회전부와 정지부를 연결해 주는 slip-ring이라는 특수한 구조를 통해 PC와 모니터 내지는 레코더에 연결된다. 일반적으로 slip-ring에서 모든 계측신호가 전달되므로 노이즈를 최소화하기 위해 고전도체의 재질을 사용하나, 본 장비는 광섬유를 이용한 Fiber Optic Rotary Joint(FORJ)를 사용하여 노이즈 차단을 더욱 강화하였다. FORJ는 slip-ring의 역할과 같은 것으로서 고속으로 회전하고 있는 각종 센서로부터의 데이터를 조정실에서 안전하게 수집할 수 있게 한다. 또한 원심모형 실험중 모형의 거동을 육안으로 관찰하거나 실험중 안전을 위해 용기 탑재부에 비디오 카메라 1대, 비행실 내부에 비디오카메라 2대, CCTV 2대가 설치되어있다.

2.3 실험 종류

터널 라이닝은 변상되거나 파괴를 일으키면 그 기능이 저하되거나 상실된다. 터널에 발생하는 변상은 터널에 지압 등과 같은 외력이 작용하여 발생하는 변상, 터널 라이닝 자체가 결함을 포함하는 경우, 시간이 경과함에 따라 노후화되어 발생하는 변상 등으로 나뉘어 이들에 대한 역학적 거동 파악이 필요하다.

본 논문에서 무결합 라이닝(모델명 AD0)를 비롯하여, 라이닝 천단 및 어깨부가 배면공동으로 지반과 일체화되지 않는 경우(모델명 AD1-1, AD1-2), 라이닝 타설이 제대로 되지 않아 천단부의 두께가 부족한 경우(모델명 AD2), 인버트를 설치하지 않은 경우(모델명 AD3), 재래식으로 측벽부와 아치부를 따로 제작하여 측벽결합을 포함하고 있는 경우(모델명 AD4)로 나누어 모형화 하였다(Fig. 6).

배면공동은 지반과 라이닝 사이에 발생하는 빈 공동을 일컫으며 보통 여굴이나 수압의 영향으로 발생한다. 이러한 배면공동은 라이닝과 지반이 일체화 거동을 하지 않을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 배면공동을 직경 30 mm의 알루미늄판을 반으로 분할하여 라이닝 천단부 및 어깨부에 접착하는 것으로 모사하였다. 즉 배면공동부분에서

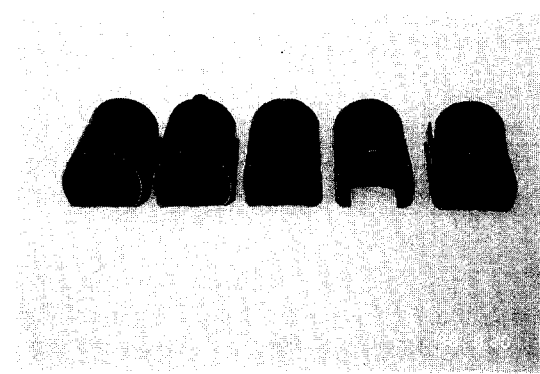


Fig. 6. 1/100-scaled aluminum lining models.
(from the left, AD0, AD1-1, AD2, AD3, AD4)

지반과 라이닝은 접촉하지 않는다. 천단부 두께가 부족한 경우는 천단부 두께를 3 mm에서 1.5 mm로 줄여 모사하였다.

터널 표준 시방서에 의하면 지반이 불량하거나 지형조건상 편압 발생이 예상되는 경우, 콘크리트 라이닝이 구조적 기능을 발휘하는 경우에는 인버트 설치를 원칙으로 하지만 원지반의 특성을 고려하여 설치하지 않을 수도 있고, 특히 재래식 터널의 경우 인버트를 설치하는 경우가 많다. 본 연구에서 무인버트 라이닝은 인버트 전체를 제거하지 않고 좌우 1/4씩 남겨두었다. 이는 터널 라이닝 모형두께가 너무 얇아 모래지반에서 충분한 반력을 생성하지 못하여 라이닝 침하가 발생할 수 있기 때문에 바닥에 얇은 알루미늄판을 덧대었다. 그리고 무인버트 라이닝 바닥면이 알루미늄판 위에서 자유롭게 활동하도록 접촉면에 실리콘 오일을 발라주었다.

재래식 터널의 경우 측벽을 설치하고, 그 위에 아치부를 얹어 라이닝을 설치하는 경우가 있다. 이 때 측벽과 아치부의 시공조인트는 수평방향 지반 소성압인 외력에 의해 불리한 영향을 받을 수 있다. 본 실험에서는 알루미늄 라이닝에 대해서만 양쪽 어깨부를 절단하여 측벽결합 모형을 만들었다.

2.4 감사법에 의한 주문진 표준사 지반작성

본 원심모형실험을 위한 지반하중을 일정하게 유지하기 위해서는 균질한 지반 작성이 가능해야 한다. 이를 위해 입자크기 분포가 균등한 주문진 표준사를 이용하였다. 체 분석을 통하여 구한 주문진 표준사의 균등계수 C_u 는 1.56으로서 표준사 입자크기가 균일하다는 것을 알 수 있으며, 곡률계수 C_c 는 1.16으로 입도분포가 좋다고 할 수

Table 1. Properties of Joomoonjin standard sand

Specific gravity, G		2.62
Max. dry unit weight(g/mm ³), γ_{dmax}		1.67
Min. dry unit weight(g/cm ³), γ_{dmin}		1.38
Relative Density (D) _{ave} = 86%	Young's modulus (kg/cm ²)	500
	Internal friction angle (°)	37.8

있다. 주문진 표준사의 기본 물성은 Table 1과 같다. 표준사의 탄성계수는 삼축시험으로부터 구하였다. 삼축 시험에서 구한 탄성계수는 축차응력 변형을 곡선의 기울기 이므로 그 값은 축변형률과 구속응력에 따라 달라진다. 모형실험에서 예상되는 구속응력(1-2 kg/cm²)을 고려하여 응력-변형률의 선형구간에서 탄성계수를 구하였다.

원심모형실험은 고정밀도를 요구하는 실험으로 모래지반에 관한 실험의 전제 조건으로서 지반의 조성은 매우 중요하다. 즉 중력장에서 조성되는 용기내의 모래지반은 그 상대밀도가 위치별로 일정해야 한다. 본 실험에서는 강사법에 의한 표준사 지반조성을 계획하고 이를 충족시킬 수 있는 강사기(sand rainer)를 이용하였다. 강사기의 진동판 낙하고와 왕복속도를 변수로 설정한 후, 용적을 알고 있는 9개의 알루미늄 캔에 표준사를 낙하하여 상대 밀도 80% 이상 표준사 지반조성을 위한 낙하고 및 왕복 속도를 결정하였다. 이후 원심모형용기(container) 내부에 알루미늄 캔을 넣고 상대밀도를 측정하였다. 용기는 세워 놓은 경우(폭이 좁음), 눕혀 놓는 경우(전면판을 제거함) 2가지로 정하였다.

먼저 용기를 세워 놓은 경우에는 높이가 500 mm에 이르기 때문에 이를 세 개의 층으로 나누어 지반 조성한 경우 80% 이상의 조밀한 모래가 되었으며, 평균상대밀도는 84%로 나타났다. 용기를 눕혀 20개의 알루미늄 캔을 넣

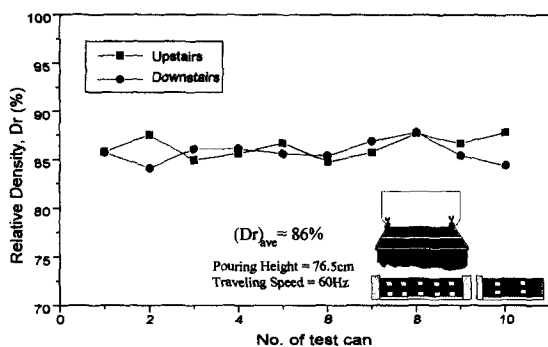


Fig. 7. Relative density of Joomunjin standard sand by container lying method.

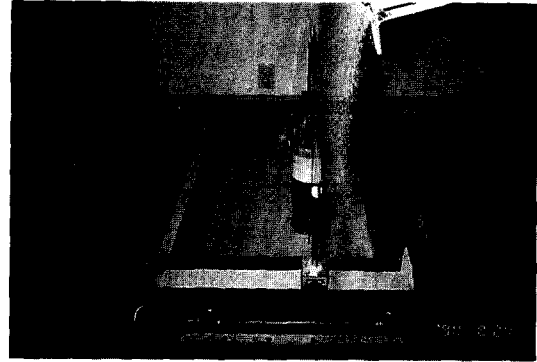


Fig. 8. Sand pouring process using automatic sand rainer.

고 지반을 조성한 경우에는 평균상대밀도가 약 86%로 나타났다(Fig. 7). 용기를 세운 경우와 약간의 차이가 나는 이유는 용기를 세웠을 때 모래가 들어가는 입구가 좁힌 경우보다 좁았기 때문으로 생각되지만, 지반공학적인 관점에서 보면 거의 차이가 없는 조밀한 모래지반이라 할 수 있다. 그러나 터널 라이닝 주변장을 따라 균질한 지반을 조성해야하므로 Fig. 8과 같이 용기를 눕힌 상태에서 지반을 조성하였다.

2.5 실험 순서

2.5.1 라이닝 모형 준비단계

1) 라이닝 외벽에 부착하는 변형률 게이지와 라이닝 토압계의 리드선을 라이닝 내부를 통해 용기 밖으로 유도하기 위해 후면에 원주방향으로 작은 구멍을 뚫는다.

2) 준비된 라이닝에 내외벽의 위치를 정확히 맞추어 변형률 게이지와 라이닝 토압계를 부착한다. 센서의 리드선들은 느슨해지지 않게 테이프로 고정한다.

3) 원심비행중 라이닝 내부로 모래가 유입되는 것을 방지하기 위해 마찰이 적은 고무패킹을 이용하여 라이닝 주변장을 따라 부착한다.

2.5.2 용기 준비단계

4) 전면판이 제거된 실험용기를 눕혀 놓고, 상부 플라스틱 판으로 지표고를 맞춘다. 용기의 나사공으로 모래가 들어가지 않도록 테이프로 에워싼 후, 지반 조성용 틀을 용기 위에 설치한다.

5) 주어진 위치에 실, 테이프, 쇠자를 이용하여 지중토압계를 미리 설치한다. 이 때 쇠자는 실과 테이프를 고정시키기 위한 것이며, 낙하하는 모래의 영향을 받지 않게 가급적 얇아야 한다. 설치후 리드선은 상단 플라스틱 판

의 흡을 통해서 외부로 유도된다.

6) 모래지반과의 마찰을 최소화 시키기 위해 용기 내부면 및 라이닝 전후면에 실리콘 그리스를 바른다. 라이닝을 용기내부에 설치시, 먼저 게이지 및 토압계 리드선들을 용기 뒷면의 리드선 유도공으로 조심스레 빼내면서 위치를 잡고, 지반 작성시 라이닝 내부로 모래가 들어가지 않도록 뒷면에 테이프를 붙인다.

2.5.3 지반작성 단계

7) 지반낙하하고와 왕복속도를 맞춘 후, 반 정도 쌓을 횟수의 카운터를 맞춘 후, 테이프가 붙어 있는 라이닝 뒷면에 모래가 직접 쌓이지 않도록 간이용 모래받이를 놓고, 지반작성을 시작한다.

8) 설정 카운터에 도달하면 모래는 반쯤 쌓여있다. 이때 가위를 이용하여 미리 매달아 놓은 지중토압계의 실과 테이프를 끊어주고, 이를 받치고 있는 가이드를 모두 제거한다. 카운터를 재조정하여 모래지반을 다시 작성한다.

2.5.4 지반성형 및 마무리단계

9) 트리머(trimmer)를 이용하여 지반 표면을 편평하게 다듬는다. 트리머의 손길이 미치지 않는 곳은 진공청소기를 이용하여 마무리한다. 그 후 용기 전면보강판에 실리콘 오일을 골고루 바른다.

10) O-링을 채우고, 용기 전면판을 덮은 후, 나사를 이용하여 완전히 조립한다. 공기압축기로 주변 먼지를 털어준 후, 용기의 총무게를 측정한다.

11) 용기를 원심기(centrifuge)에 탑재시킨 후, 지표면 침하 측정용 LVDT를 용기 상단부에 설치한다. Fig. 9는 비행전 완전히 조립된 상태이다. 이후 각종 계측기 선들을 중계박스(junction box)에 연결한다.

12) 각종 계측기들의 이상여부를 점검하고, 이상이 없으면 원심재하실 내부에 사람 및 기타 장비가 없는지 확인

후, 원심재하실을 밀폐한다.

13) 원심비행을 실시한다. 비행가속도는 10 g, 20 g, 40 g, 60 g, 80 g, 100 g로 서서히 올리며 각 구간에서 5분씩 비행한다. 비행중 각종 계측정보를 자동으로 저장한다. 원하는 g 까지 상승한 후 서서히 하강하면서 실험을 마친다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 원심모형실험의 해석에 앞서 다음과 같은 가정 및 정의의를 해둔다. 모든 실험결과는 2차원 평면 변형률(plane strain) 조건으로서 축소가 아닌 실험크기로 표현하였다. 따라서 라이닝 설치 이전에 응력 개방 효과 및 막장에 의한 3차원적 효과는 무시한다. 또한 비록 변형률 게이지와 라이닝 토압계가 위치한 단면이 종방향으로 약간의 차이가 나지만 해석상 동일단면으로 가정하며, 라이닝과 용기 벽면의 마찰은 발라준 실리콘 오일 때문에 무시할 만큼 작다고 가정한다.

3.1 정지토압계수

20 g 간격으로 100 g 까지 수평/수직응력비인 정지토압계수 K_0 를 측정하여 평균한 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 보듯이 수직 및 수평 지중 응력이 각 모델마다 약간씩 차이가 나지만, 상대밀도 평균 86%의 주문진 표준사 지반에서는 수평응력이 수직응력의 약 0.3~0.5 사이로 수직응력이 크게 나타났으며, 평균치는 약 0.39이다. 그런데 앞서 상대밀도 86% 표준사의 내부 마찰각은 37.6°로서, 이것을 점착력이 없는 사질토 지반의 정지토압계수를 유추하는데 많이 사용되는 Jacky의 공식에 대입하면 약 0.39로서 그 결과가 실험 평균치와 일치함을 알 수 있다($1 - \sin 37.6^\circ \approx 0.39$).

0.5D 거리에 위치한 AD0, AD1-1, AD2의 수직 및 수평 지중토압은 수직에 비해 수평응력이 약 1.2-1.6배



Fig. 9. Setup for centrifuge tunnel test.

Table 2. Earth pressures and its coefficients (Unit : kg/cm²)

	Ver-1	Hor-1	K_0	Ver-2	Hor-2	K_p
AD0	4.35	1.40	0.32	4.18	2.31	0.55
AD1-1	4.27	1.88	0.44	4.48	2.29	0.51
AD1-2	4.24	1.74	0.41	4.36	-	-
AD2	4.02	1.55	0.39	4.39	2.56	0.58
AD3	4.66	1.55	0.33	5.23	1.64	0.31
AD4	3.67	1.74	0.47	4.14	1.88	0.45

Table 3. Surface settlements at 100 g : Average Dr=86% (unit : mm)

	AD0	AD1-1	AD1-2	AD2	AD3	AD4
Settle1	3.44	3.23	1.82	3.24	3.18	2.15
Settle2	3.19	3.00	0.95	3.00	2.99	1.33
Settle3	2.50	2.53	0.71	2.52	2.42	1.00

가량 증가하였는데, 이는 라이닝의 변형이 수평으로 발생하여 수동토압이 작용했기 때문이다. 그러나 AD3 및 AD4는 예상으로 라이닝 수평응력에 비해 수직응력의 증가분이 크게 나타났는데 이는 라이닝의 하단 및 측벽이 일체화되지 않아 이 부분을 향해 지반이 약간 느슨해졌기 때문으로 생각된다.

3.2 지표 침하

원심비행 중에 지반은 자중 압밀에 의해 침하가 발생한다. 본 실험에서는 실제 현장의 시공상황을 모사한 것이 아니기 때문에 지표침하를 정량적으로 평가하는 것은 큰 의미가 없다. 각 실험에 따라 차이는 있으나 일반적으로 터널 중심에서 멀어질수록 침하량이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 원심가속도장이 반경방향으로 증가하기 때문이다(Table 3). 이러한 침하는 원심모형실험의 성격상 발생하는 것으로서 동일한 무게에서 지반의 부피가 감소하기 때문에 상대밀도가 높아지지만 그 영향은 크지 않다. 만일 침하량이 3 mm라고 가정한다면 상대밀도는 1% 미만으로 증가하게 된다.

3.3 알루미늄 라이닝의 변형률

3.3.1 표준형 AD0

원심모형실험 결과 표준사의 자중에 의한 라이닝 원주

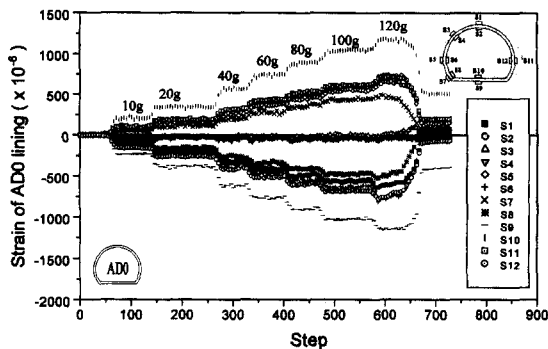


Fig. 10. Strains of AD0 tunnel lining (standard).

변형은 대부분 Fig. 10과 같은 표준 알루미늄 라이닝 (AD0)의 변형률 양상을 나타내었다. 그림에서 보듯 라이닝 천단(crown)에서는 주동토압에 의해 내부변형률(S2)은 인장(+), 외부변형률(S1)은 압축(-) 상태가 되었다. 이에 비해 스프링라인(spring line) 좌측 및 우측에서는 천단과 반대의 양상을 보였는데 이는 본 실험에서 측정된 정지토 압계수 Ko가 평균 0.39로 수평압보다 수직압이 크기 때문이며 스프링라인에서 수동토압이 발생하였다. 즉, 스프링라인 내부변형률(S6, S12)은 압축을, 외부변형률(S5, S11)은 인장상태를 나타내었다. 또한 천단의 압축변형률(S1)이 스프링라인의 압축변형률(S6)보다 크기가 작게 나타났는데 이는 라이닝의 곡률 때문으로 생각된다. 즉 천단 외벽의 압축변형률은 원호 곡률의 반대 방향으로 압축되지만 스프링라인 내벽의 압축변형률은 원호의 정의만 곡 방향으로 압축되었기 때문이다.

라이닝 좌측 어깨부(shoulder)에서의 변형률 S3, S4는 거의 0에 근접한 인장, 압축을 나타내었다. 이는 주동토압이 작용하는 천단은 자유면을 향하려고 하고, 수동토압이 발생하는 스프링라인은 지반을 향하려고 하기 때문에 중간지점인 어깨부에서 이 둘의 변형양상이 서로 교차되었기 때문이다. 그러므로 휨모멘트는 천단을 기준으로 45도 근처에서 방향이 전환됨을 알 수 있다. 한편 좌측하단 각부(haunch)에서는 외부변형률 S7은 인장, 내부변형률 S8은 압축을 받고 있어 스프링라인의 변형양상과 유사하며, 그 크기는 어깨부 변형률보다 크게 나타났는데 이는 라이닝 형상이 마제형이기 때문에 편평한 인버트에서는 지반하중이 치력으로 분산되지 못했기 때문이다. 이로 인해 인버트에서의 내외부 변형률(S9, S10)이 가장 크게 나타났다.

3.3.2 천단배면공동 AD1-1

천단 상부에 배면공동이 존재하더라도 인접부에서 받는 하중의 영향으로 원주변형률이 발생하였다. 하지만 크기는 압축, 인장모두 표준형 AD0 천단의 40% 이하로 나타났다(Fig. 11). 특히 어깨부에서는 외벽 S3가 내벽 S4보다 큰 압축변형이 함께 발생하였다. 이는 천단하중 공백현상으로 인해 배면공동 인접부분의 수직압이 천단부에 비해 상대적으로 높게 나타나 어깨부 외벽 S3에서 압축변형이 발생한 것으로 생각된다.

3.3.3 어깨배면공동 AD1-2

AD1-2에서는 천단 외벽 S1은 인장변형률을, 내벽 S2에서는 압축변형률을 나타내어 다른 라이닝들과 반대되는 변형현상을 나타내었다(Fig. 12). 이는 좌측 어깨부가

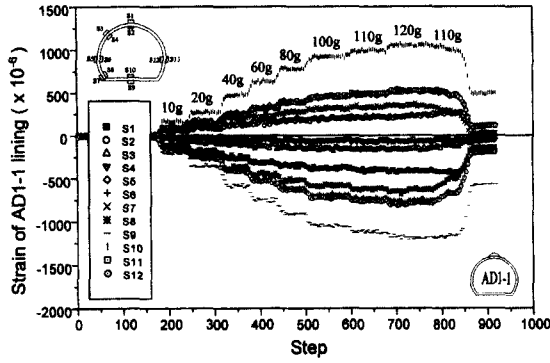


Fig. 11. Strains of AD1-1 tunnel lining (void behind the crown).

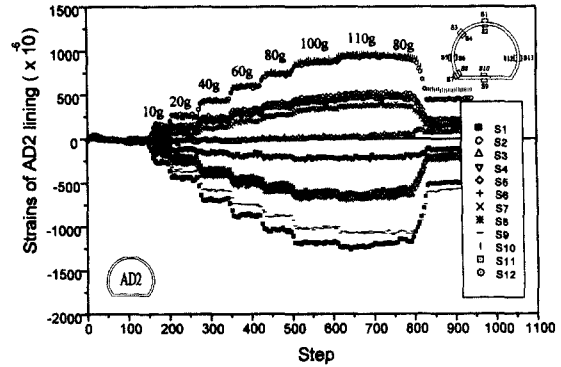


Fig. 13. Strains of AD2 tunnel lining (shortage of thickness at the crown).

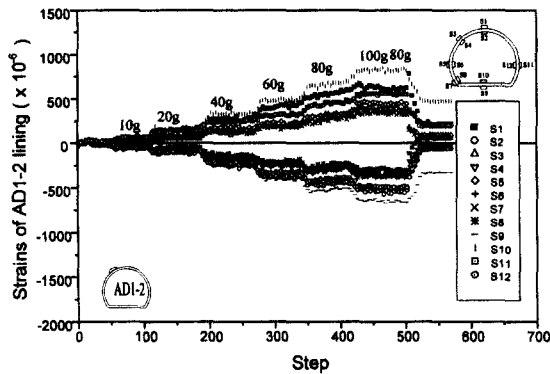


Fig. 12. Strains of AD1-2 tunnel lining (void behind the left shoulder).

배면공동이 지반과 분리되어 있는 자유면 역할을 하게되면서 변형 양상이 상대적으로 취약한 배면공동을 향하였기 때문으로 생각된다. 따라서 좌측 어깨부 배면공동의 영향으로 라이닝을 기준으로 우측에서 좌측으로 편압이 가해지는 양상을 보였다. 좌측 어깨부는 배면공동으로 인해 지반하중을 받지 않지만 배면공동 근접부에 가해지는 하중과 배면공동의 영향으로 외벽 S3는 인장을, 내벽 S4는 압축을 나타내었고, 그 크기는 표준형 AD0에 비해 30배 이상 증가하였다. 이러한 편압의 영향으로 스프링라인의 변형은 우측 S11, S12가 좌측 S5, S6보다 많이 변형하였으며, 바닥부의 S9, S10은 표준형에 비해 40% 감소하였다.

3.3.4 천단부 두께부족 AD2

AD2는 천단부 두께가 3 mm에서 1.5 mm로 절반이 줄어든 경우로서 예상과 같이 천단부에서 가장 큰 변형률을 보였다(Fig. 13). 천단 압축변형률 S1은 AD0에 비해 2배가 증가하였고, 인장변형률은 S2는 1.5배 증가하였다.

어깨부 외벽 S3는 표준형 AD0와 큰 차이를 보이지 않는 인장변형이 발생하였으나, 내벽 S4는 4배가 큰 압축변형이 발생하여 천단 두께부족의 영향이 압축변형에 더욱 영향을 주는 것으로 나타났다. 스프링라인 및 각부에서도 AD0에 비해 압축변형률은 증가한 반면 인장변형률은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 인장변형률이 발생한 부분이 라이닝 외벽으로서 수동상태가 되어 지반 반력을 받고 있기 때문이다.

3.3.5 무인버트 AD3

AD3는 인버트가 존재하지 않으므로 스프링라인의 변형률이 가장 크게 나타났으며, 동시에 각부의 변형도 증가하여 인버트에 가까울수록 AD0와 많은 차이가 발생하였다(Fig. 14). 특히 각부는 천단부의 변형률보다 크게 나타났다. 스프링라인의 변형률은 좌우가 완전히 대칭되지는 않았는데 이는 터널 내부로 모래가 유입되지 않도록 깔아놓은 반력판과 무인버트면이 완전히 밀착되지 않아 약간 기울었기 때문으로 생각된다. 스프링라인의 변형률은 AD0에 비해 평균 1.5배 증가하는 경향을 보였다. 또한

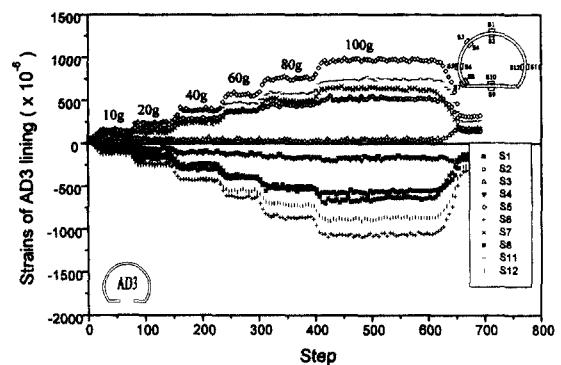


Fig. 14. Strains of AD3 tunnel lining (no-invert).

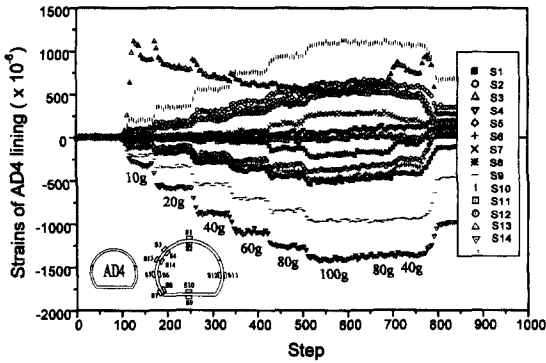


Fig. 15. Strains of AD4 tunnel lining (side-wall flow).

어깨부 압축변형률 S4도 AD0보다 3배 가량의 증가현상을 보였다.

3.3.6 측벽결합 AD4

AD4 천단부에서는 스프링라인보다 약간 큰 변형률이 발생하였다(Fig. 15). 어깨부는 AD0와 반대로 외벽 S3에서 압축, S4에서 인장변형률이 발생하여 주동영역이 되었다. 이러한 현상들은 측벽결합부분이 새로운 하중지점 역할을 하기 때문에 어깨부도 주동상태가 된 것으로 판단된다. 한편 AD4에서는 측벽결합부분에도 변형률 게이지를 부착하였다. 측벽결합 외벽 S13에는 인장변형이, 내벽 S14에는 압축변형이 발생하여 지반을 향하는 수동상태가 되었다. 압축변형 S14는 측벽결합에 의해 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 반면에 인장변형 S13은 초반 급증 후 오르락 내리락 하다가 점차 안정화되어 오히려 변형이 줄어드는 것으로 나타났는데 이는 하중증가에 의한 지반반력의 도움 때문으로 생각된다. 즉 지반이 측벽결합의 인장변형을 억제하는 것으로 나타나 결과적으로 터널이 붕괴하지는 않았다. 그러나 만일 지반과 접촉하지 않는 자유면이 이곳에 존재한다면 위와 같은 현상을 보이기는 힘들 것이다.

3.4 알루미늄 라이닝의 휨모멘트 및 축력

라이닝 내외 원주 변형률로부터 라이닝의 단위 길이 당 휨모멘트(M)와 축력(T)을 (5), (6)식으로 계산할 수 있다¹²⁾. 휨모멘트 부호는 터널 중심을 향한 변형을 유발하는 휨모멘트를 '정'(+), 그 반대로 지반을 향한 변형을 유발하는 휨모멘트를 '부'(-)로 정의하였다. 반면에 축력의 부호는 인장력이 우세하면 '정(+)' 혹은 인장축력, 압축력이 우세하면 '부(-)' 혹은 압축력으로 정의하였다.

$$M = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot I \cdot \frac{\epsilon_i - \epsilon_o}{t} \tag{5}$$

$$T = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{(\epsilon_i + \epsilon_o) \cdot t}{2} \tag{6}$$

여기서,

E : 라이닝의 탄성계수(kg/cm²)

t : 라이닝의 두께(cm)

I : 2차 단위 관성모멘트(= t³ / 12)

ε_i : 라이닝 내벽 원주 변형률

ε_o : 라이닝 외벽 원주 변형률

원심재하는 100 g 상태까지 20 g 씩 순차적으로 가했기 때문에 휨모멘트와 축력은 각각 천단부, 어깨부, 스프링라인, 각부, 인버트 순서로 g-수준에 대해 도시하였다. 휨모멘트 및 축력들은 콘크리트 라이닝의 항복모멘트(M₀) 및 극한축력(T₀)으로 정규화(normalized)시켜 표현하였다.

3.4.1 천단부의 휨모멘트

천단에서의 라이닝 휨모멘트는 좌측 어깨 배면공동(AD1-2)을 제외하고 유사한 경향을 보였다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 천단에서는 AD1-2를 제외하고 모두 정의 휨모멘트를 나타내고 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 천단부에서는 상재하중이 주동토압(active earth pressure)으로 작용하고 있기 때문이다. 그 크기를 비교해 보면 천단두께부족인 AD2가 이미 20 g에서부터 탄성한계를 넘고 있음을 알 수 있다. AD2는 천단두께단면이 50% 축소된 경우로서, 표준 AD0에 비해 약 80%의 휨모멘트가 증가하였다. 천단배면공동이 존재하는 AD1-1은 비록 천단부분에 직접적인 지반하중을 받지 않지만, 항복모멘트의 70% 수준까지 증가하였다. 하지만 표준인 AD0의

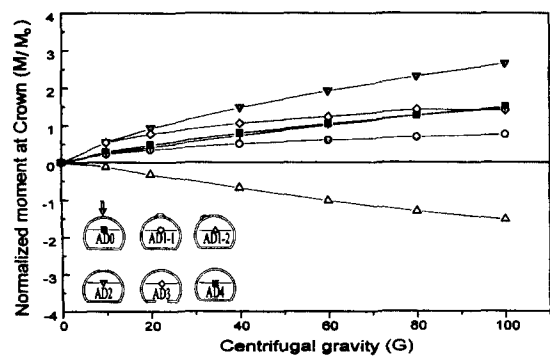


Fig. 16. Normalized moment at the crown of aluminum lining.

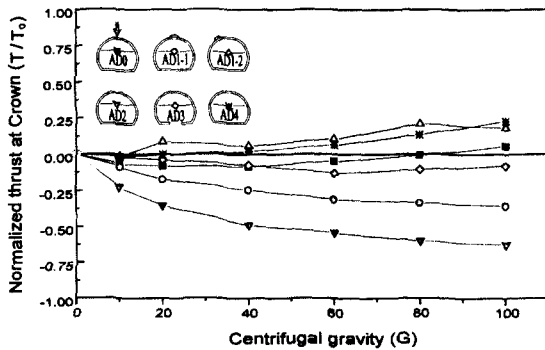


Fig. 17. Normalized thrust at the crown of aluminum lining.

절반 수준밖에 되지 않는다. 한편 좌측 어깨부 배면공동이 있는 AD1-2은 천단부에서 변형률 양상이 표준형과 반대의 양상을 보여 항복모멘트를 초과하는 '부'의 휨모멘트를 나타내었다. 즉 천단부이지만 지반을 향한 휨모멘트가 발생한 것이다. 이는 우측에서 좌측으로 편압을 받는 형국으로서, 좌측 어깨부 배면공동(일종의 취약대)쪽으로 천단 변형이 굴곡 되려는 양상이다. 무인버트 AD3의 경우 휨모멘트가 초반에는 급증하였으나 원심가속도가 증가함에 따라 타 라이닝에 비해 상대적으로 천단 변위가 증가하게 되어 휨모멘트의 증가율이 둔화되는 경향을 나타내었다.

3.4.2 천단부의 축력

라이닝에서의 압축력은 한계치를 넘지 않는다면 아치구조물을 지탱해주는 원동력이 된다. 천단부의 축력은 Fig. 17과 같이 라이닝 조건에 상관없이 초기 10 g까지는 압축력을 나타내다가 하중이 증가할수록 다른 양상을 보여, AD1-1, AD2, AD3은 압축력을, AD0, AD1-2, AD4는 인장력을 보였다. AD0를 기준으로 절대치로 비교해보면 그 크기는 천단부 결합에 직접 가까울수록 정의 휨모멘트가 커짐과 동시에 그만큼 축력의 저항도 크다는 것을 알 수 있다. 이로부터 극한축력을 넘지 않은 범위 내에서는 휨에 대해 자체 축력으로 저항하려는 아치구조물의 특성을 엿볼 수 있다. AD2의 축력은 AD0보다 11배, AD1-1은 6배, AD4는 4배 큰 축력을 나타내어 천단 결합에 가까울수록 축력도 증가하였다. AD0의 천단 축력은 처음에는 압축력을 유지하다 결국 100 g에 이르러 인장력으로 변경되었으나 그 크기는 항복축력의 6%에 지나지 않는다. AD3는 최종적으로 압축력을 받고있지만, 60 g를 지나면서 AD0처럼 인장력을 받으려는 경향을 나타내었다. AD1-1은 천단에 재하가 직접 이루어지지 않았지만 배면

공동 주변의 재하로 인해 최대축력의 35%에 해당하는 압축력을 받고 있다. AD2는 천단에서 항복축력의 60%에 이르는 압축력을 유지하고 있다. 이는 두께부족으로 인해 외부 천단부가 주변에 비해 유연해져서 천단외부 압축변형률이 내부 인장변형률의 절대치보다 커졌기 때문으로 사료된다. AD1-2는 취약부인 좌측 어깨부 배면공동영향으로 20 g를 지나면서 천단 외벽의 인장변형률이 내벽 압축변형률보다 크게 발생하여 인장축력을 나타내었다. 천단부의 인장축력은 자유면을 향해 발생하면 라이닝에 불리한 영향을 주게되지만 AD1-2는 자유면이 아닌 지반을 향하므로 불리함은 어느 정도 감소했다고 생각한다. AD4는 측벽결합부가 타 라이닝과 달리 새로운 라이닝 지점 역할을 하여 어깨부까지 정의 휨모멘트를 나타내었다. 이로 인해 천단 아치부 내벽 압축변형률보다 외벽 인장변형률이 크게 나타나 인장력을 나타내었다. 그러나 그 값은 최대축력의 20%에 지나지 않았다.

3.4.3 어깨부의 휨모멘트

어깨부는 주동상태인 천단부와 수동상태인 스프링라인의 중간지점으로 변형양상이 서로 상충하는 구간이기 때문에 원주 변형률이 크지 않았었다. 이로 인해 어깨부의 휨모멘트는 대체로 천단 휨모멘트의 3-20% 미만의 값을 나타내었다. AD0, AD2, AD3, AD1-2의 경우 어깨부는 부의 휨모멘트를 나타내어 수동영역이 되었으며, AD1-1, AD4는 천단과 동일한 정의 휨모멘트가 발생하여 주동영역이 되었다(Fig. 18) AD2, AD3는 표준형 AD0에 비해 큰 천단 변형의 영향으로 어깨부 내벽 S4의 압축변형률이 외벽 S3의 인장변형률의 절대값보다 크게 발생하여 부의 휨모멘트가 발생하였다. 즉 AD0, AD2, AD3는 천단부의 정의 휨모멘트가 어깨부에서 부의 휨모멘트로 전향하였음을 알 수 있다. AD1-2의 좌측

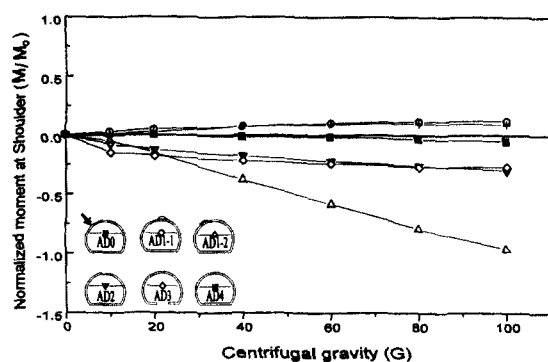


Fig. 18. Normalized moment at the shoulder of aluminum lining.

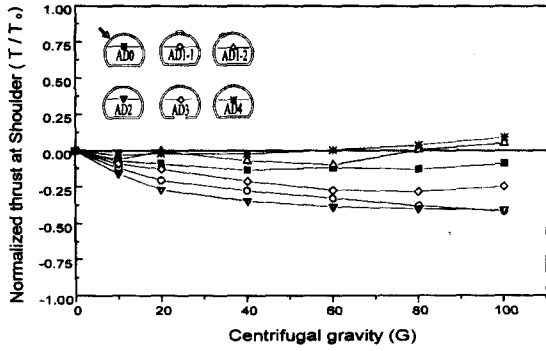


Fig. 19. Normalized thrust at the shoulder of aluminum lining.

어깨부는 직접 지반과 접촉되어 있지 않지만 하중의 비대칭 현상이 발생하여 항복휨모멘트의 96%에 달하며, AD0의 18배에 해당하는 부의 휨모멘트가 발생하였다. AD1-1은 천단 배면공동으로 인해 어깨부 내외벽 모두 압축변형이 발생하였지만, 그 크기는 외벽 S3가 내벽 S4보다 약간 크게 나타나 결과적으로 휨모멘트는 천단부와 동일한 정의를 값을 나타내었다. 이와 달리 AD4의 변형률은 S3가 압축변형, S4는 인장변형을 나타내었다. 이는 측벽결합부가 새로운 하중지점으로 작용하면서 줄어든 아치부의 어깨부도 주동상태가 되었기 때문으로 생각된다. 이로 인해 AD4의 어깨부에서는 천단부와 동일한 정의 휨모멘트가 발생하였다.

3.4.4 어깨부의 축력

어깨부 축력은 천단부와 유사하게 AD1-2, AD4를 제외하고 대부분 압축력을 유지하고 있다(Fig. 19). 압축력의 크기는 AD1-1, AD2, AD3, AD0 순으로, AD0에 비해 결함을 포함하고 있는 라이닝의 축력이 2.7배에서 4.7배 가량 크게 나왔다. 특히 천단부 결함이 있는 AD1-1, AD2는 그 영향권이 어깨부까지 나타났음을 알 수 있었다. 앞서 AD1-1은 어깨부에서 자유면을 향한 정의 휨모멘트가 발생하였고, AD2는 표준형보다 큰 부의 휨모멘트가 발생하였지만, 둘 다 극한축력을 벗어나지 않는 압축력을 유지하고 있다. AD1-2과 AD4의 어깨부는 초반 20g부터 인장력으로 전향되었던 천단부와 달리 80g이상에서 전향되었다. 따라서 AD1-2는 좌측 어깨부에서 항복값에 근접한 부의 휨모멘트와 인장 축력을 받고 있다. 이러한 상황에서 만일 AD1-2가 균열하중까지 이른 현장 콘크리트 라이닝이라면 좌측 어깨부 외벽에서는 인장균열이, 내벽에서는 압축 전단에 의한 압좌 균열이 발생했을 가능성이 많다. 즉, 터널 안전진단시 라이닝

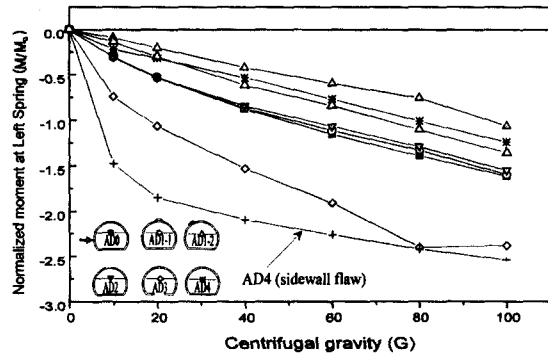


Fig. 20. Normalized moment at the springline of aluminum lining.

내벽을 육안으로 조사했을 때 어깨부 내벽에서 압축전단에 의한 압좌 균열이 많이 발생했다면, 이 어깨부에 배면공동이 존재함을 시사한다. 이에 반해 AD4는 정의 모멘트이면서 인장 축력을 나타내었으나 전체적인 크기는 크지 않았다.

3.4.5 스프링라인의 휨모멘트

스프링라인에서의 휨모멘트는 라이닝마다 크기의 차이는 있으나, 모두 부의 휨모멘트가 발생하였다. 수평압에 비해 수직압이 크게 작용하기 때문에 스프링라인의 변형은 지반을 향하게 된다. 그러므로 스프링라인에서는 수동 토압(passive earth pressure)이 발생하게 되고 이로 인해 지반에는 반력이 생성된다. 알루미늄 라이닝의 좌우측 거동은 상호 유사하기 때문에 좌측을 기준으로 도시하였다(Fig. 20). 스프링라인에서의 휨모멘트의 크기는 표준형 AD0를 기준으로 했을 때, 천단부 구조적 결함인 AD1-1, AD2 순으로 나타났지만 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 천단의 구조적 결함이 스프링라인까지 큰 영향을 주진 못했다. AD1-2의 경우 표준형보다 좌측 휨모멘트는 35%, 우측 휨모멘트에 15% 작게 나타나 배면공동의 영향으로 좌측의 휨모멘트가 더욱 감소된 것으로 나타났다. 한편 무인버트 AD3의 스프링라인은 항복모멘트의 약 2배의 휨모멘트가 발생하였으며, 이는 표준형 AD0의 1.5배에 해당한다. 인버트는 수평압의 증가나 지반의 부풀어오름 등에 의한 외부 하중 등도 분담하며, 라이닝 하단 좌우측 각부(haunch)를 연결시켜주어 라이닝 전체가 균등하게 지반하중을 분담할 수 있도록 한다. 따라서 인버트가 존재하지 않는다면 스프링라인의 휨모멘트가 표준에 비해 증가함은 당연한 것이다. 측벽결합 AD4는 라이닝이 완전한 일체화 거동을 하지 않았기 때문에 표준 AD0의 휨모멘트에 비해 24%가 감소하였다. 측벽

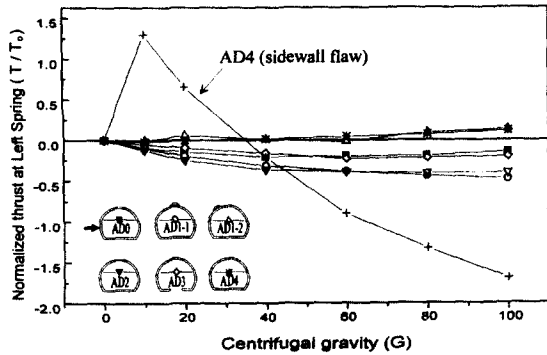


Fig. 21. Normalized thrust at the springline of aluminum lining.

절합부분에서의 휨모멘트는 하중 재하 초반에 지반을 향한 부의 방향으로 급증하였지만, 원심재하가 이루어질수록 지반에 의한 반력도 동시에 증가하여 휨모멘트의 증가율은 둔화되었다.

3.4.6 스프링라인에서의 축력

스프링라인에서의 축력은 크기에는 다소 차이가 있으나 어깨부의 경향과 유사하다(Fig. 21). 압축력은 AD1-1, AD2, AD3, AD0 순으로서, 표준형에 비해 결함이 있는 라이닝의 축력이 같거나 많게는 3배 증가하였다. 하지만 절대치로는 여전히 항복값에는 도달하지 못하였다. 앞서 스프링라인의 외벽에서는 인장, 내벽에서는 압축변형률이 발생하였지만, 그 절대크기는 압축변형이 크게 나타났다. 이는 지반과 접촉한 외벽은 지반 반력으로 인해 인장변형률이 압축변형률에 비해 상대적으로 작게 발생하였기 때문이다. 따라서 대부분 스프링라인에서는 부의 휨모멘트가 발생하였고, 이와 동시에 압축력이 우세하여 아치형상을 유지하려는 경향을 나타내었다. 하지만 AD1-2와 AD4와 같이 스프링라인에서 인장축력이 발생하였을 때는 부의 휨모멘트를 부추겨 외벽에서 인장균열이 발생할 가능성이 있다. 한편 AD4의 측벽결함 위치에서의 축력은 그림처럼 초반엔 인장력을 받다가 하중이 증가할수록 압축력으로 전이되는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 지반의 반력이 인장변형을 억제하기 때문이다.

3.4.7 각부에서의 휨모멘트

각부에서의 모멘트는 스프링라인에서보다 크기는 작지만 거동은 유사하다. AD1-1, AD2의 천단 결합부가 이곳까지 영향을 주진 못했다. 그러나 AD1-2의 각부는 좌측 어깨배면공동의 영향으로 표준에 비해 내벽의 압축변형률이 감소하였기 때문에 휨모멘트도 30% 가량 적은 양이 발생하였다. AD4는 표준형 AD0에 비해 47%가 작은 휨

모멘트가 발생하였다. 이는 각부 내외벽의 변형률 모두가 AD0에 비해 작게 나타났기 때문이다. AD3는 표준형에 비해 1.4배 증가하여, 여전히 무인버트의 영향을 직접 받고 있음을 알 수 있다.

3.4.8 각부에서의 축력

축력의 경향은 스프링라인과 유사하였다. 표준형 AD0의 축력은 어깨부와 비슷한 수준을 보였다. AD3는 어깨부 압축력보다 1/10 가량 줄어들었다. 그러나 하중이 더욱 증가했다면, 압축력에서 인장 축력으로 바뀌었을 것으로 추측된다. 한편 AD1-1, AD2는 자신의 어깨부 압축력보다 약 10%, AD0의 각부보다 8배 증가하였다. 이는 표준형 AD0에 비해 각부 압축변형률(S8)은 증가했기 때문이다. AD1-2가 인장축력을 나타낸 것은 내벽의 압축변형률이 상대적으로 감소했기 때문이며, AD4가 인장축력을 보인 것은 압축변형률 감소량이 인장변형률 감소량보다 크게 나타났기 때문이다.

3.4.9 인버트에서의 휨모멘트

알루미늄 라이닝은 인버트에서의 가장 큰 변형률을 나타내었다. 아치구조는 외부에서 작용하는 하중을 축력, 모멘트, 전단력으로 분산시켜 구조물을 지지하게 된다. 하지만 인버트는 아치형상이 아닌 평면이므로 수직하중과 수직으로 접촉한 면이 넓기 때문에 다른 부분에 비해 가장 큰 변형률을 나타내었다. 천단과 마찬가지로 외벽은 압축 변형을, 내벽은 인장변형률을 나타내어 인버트가 솟아오르는 형상인 정의 휨모멘트를 나타내었다. 인버트에서의 휨모멘트는 라이닝마다 거의 같은 수준의 선형적 증가양상을 보였으며 편압을 받고있는 AD1-2만 상대적으로 적은 휨모멘트가 나타났다.

3.4.10 인버트에서의 축력

인버트의 축력은 AD0, AD1-2, AD4가 인장력을, AD1-1, AD2는 압축력을 나타내어 천단에서의 축력경향과 비슷하였다. 단지 차이점이 있다면 AD0가 80g 이상에서 인장 축력으로 변화되었다는 점이다. 인버트의 휨모멘트는 모두 공동 자유면을 향하는 정의 값을 나타내었지만 AD1-1, AD2는 압축력을 나타내었는데, 이는 천단 결함 라이닝의 경우 외벽 압축변형이 내벽 인장변형보다 크게 나타났기 때문이다.

3.4.11 허용응력법에 의한 라이닝 안정성 평가

일반적으로 라이닝 안전검토는 허용응력법과 강도설계법으로 나눌 수 있다. 허용응력법은 계산이 간편한 장점이 있는 반면에, 부재의 강도를 알기 어렵고, 파괴에 대한 두 재료의 안전도를 일정하게 하기가 곤란하며, 사하중

Table 4. The final distribution of the stresses acting on the each cross section of lining by combining stresses produced by thrust and moment (Unit : kg/cm², *: left shoulder)

Cross section Model	Crown		Shoulder		Springline		Haunch	
	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer
AD0	80	-70	-12	-6	-93	67	-65	53
AD1-1	2	-73	-36	-48	-122	28	-112	6
AD1-2	-58	94	-43*	53*	-39	53	-33	50
AD2	405	-656	-56	-26	-114	29	-113	8
AD3	62	-78	-38	-11	-141	96	-85	80
AD4	96	-51	14	5	-43	80	-20	43

또는 활하중과 같이 서로 성질이 다른 하중들의 영향을 설계에 반영하기 어렵다. 이에 반해 강도설계법은 파괴에 대한 안전도가 확실하고 하중계수에 의하여 하중의 특성을 설계에 반영할 수 있으나 서로 다른 재료의 특성을 설계에 반영하기 어렵고, 사용성의 확보를 위해서 별도로 검토해야 한다. 본 논문에서는 허용응력법을 이용하여 라이닝 내외면의 응력상태를 고려하고자 한다.

$$\sigma = \sigma_c \pm \sigma_b = \frac{T \pm M_b}{A} \pm \frac{M_b}{Z} < \sigma_{ca} \quad (7)$$

여기서 σ_c 는 라이닝에 작용하는 압축응력(kg/cm²), σ_b 는 휨에 의한 응력(kg/cm²), σ_{ca} 는 허용압축응력(kg/cm²), M_b 는 휨모멘트(kg-cm), T는 축력(kg), A는 라이닝의 단면적(cm²)이고 Z는 라이닝의 단면계수(=bt²/6, cm³)이다. 본 실험에서는 라이닝 모멘트가 공동 내부로 향하는 것을 정(+)으로 정의했으므로, 위 식에서 두 값을 더한 값은 라이닝 내벽의 응력상태를, 뺀 값은 라이닝 외벽의 응력상태를 나타낸다.

Table 4에서 보듯이 단일 라이닝이기 때문에 대부분 설계 콘크리트 설계 허용응력을 벗어나고, 심지어 파괴강도 이상의 응력을 보인 라이닝(AD2의 천단)도 있으나 알루미늄 재료이기 때문에 라이닝에 분포하는 응력수준을 계산할 수 있으며, 이러한 결과로부터 라이닝 각 부분 내외벽의 응력상태를 파악할 수 있다. 예를 들어 AD1-2를 제외한 모든 라이닝의 천단 정의 휨모멘트는 AD0, AD4의 경우 내벽에서의 인장응력이, AD1-1, AD2, AD3는 외벽 압축응력이 우세한 상태이며, 인장응력이 커서 내벽 인장균열 발생을 예측할 수 있다. 특히 AD1-1의 천단에서는 내벽 인장응력보다는 외벽 압축응력이 더욱 크게 나타나 배면공동과 근접한 라이닝 외벽의 압좌 가능성을 예측할 수 있다. 또한 축벽결함 AD4는 내벽의 인장응력이 압축응력에 비해 1.9배나 크게 나타났다.

어깨부에서는 대부분 모두 압축이 우세하나, 축벽결함 AD4는 내외벽에서 인장응력이 발생하였으며, 특히 AD1-2는 앞서 언급한 바와 같이 내벽에서 압축 및 외벽에서 인장응력이 작용하고 있다. 스프링라인에서는 AD1-2, AD4를 제외하고 내벽의 압축응력이 외벽 인장응력보다 크게 나타나 내벽 압좌를 예상할 수 있다. 특히 천단 배면공동 AD1-1은 천단에서 흡수 못한 변형을 에너지가 스프링라인으로 전환되어 큰 압축응력을 나타낸 것으로 사료된다. 각부의 내벽에서는 압축, 외벽에서는 인장응력이 발현되었으며, AD1-2, AD4를 제외하고 인버트로 인한 내벽의 압좌를 예상할 수 있다.

3.5 알루미늄 라이닝 토압분포

모든 라이닝 토압은 라이닝 각부분의 토피 h에 해당하

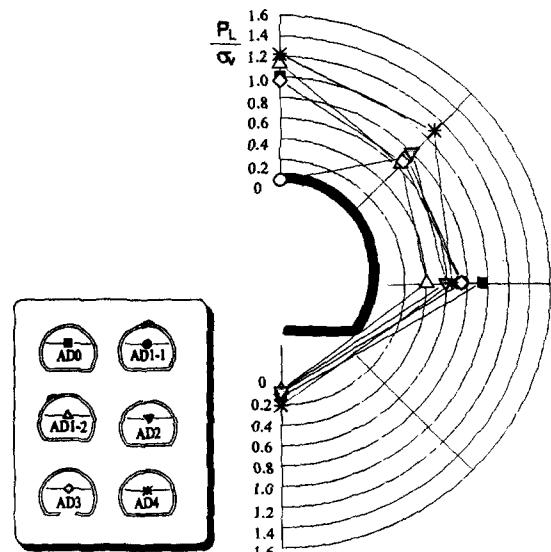


Fig. 22. Comparison of yielding ratios for aluminum lining at 100G.

는 수직토압 γh 로 나누어 정규화 하였으며, Fig. 22는 100 g에서 각 부분의 라이닝 토압을 나타낸 것이다.

천단부에서의 토압은 천단 배면공동 AD1-1을 제외하고 초기 40 g 까지 모든 라이닝에서 거의 유사한 토압을 나타내다가 60 g 이상이 되면서 라이닝마다 차이를 보이기 시작하였다. 이는 라이닝에 부착한 토압계가 단순한 지반하중 뿐만 아니라 라이닝의 변형거동의 영향을 받았기 때문이다. 측벽결합 AD4는 이론 수직압보다 약 20% 가량 토압이 크게 발생하는데, 이는 측벽결합부분이 새로운 하중지점이 되어, 라이닝 상단부인 천단, 어깨부가 지반과 더욱 밀착한 것으로 생각된다. AD1-2는 좌측 어깨부 배면공동의 영향으로 주동영역인 천단에서 유일하게 지반을 향한 부의 휨모멘트가 발생하였는데 이것이 천단 지반에 저항하여 정규 라이닝 토압이 1을 초과한 것으로 사료된다. AD0와 AD3의 정규 라이닝하중은 1에 근접하였으며 AD3가 약간 작게 나타났다. 이 밖에 천단 배면공동 AD1-1은 당연히 천단 토압이 작용하지 않으며, AD2는 토압계 이상으로 측정되지 않았다.

어깨부는 주동영역인 천단부와 수동영역인 스프링라인의 중간부분으로 이들의 상호영향이 교차하는 지역이다. 따라서 어깨부는 이들 중 우세한 영역의 거동을 따르게 된다. AD4가 1에 가까운 정규 라이닝 토압으로 가장 큰 값을 보였는데, 이로 인해 AD4의 어깨부에서도 정의 모멘트가 발생하였다. 천단두께부족 AD2의 어깨부 토압은 천단부의 0.6배에 해당하였는데, 이는 두께부족으로 인한 천단부 휨모멘트의 영향이 어깨부에 우세하게 작용한 것이다. 반면에 AD1-1는 천단의 영향을 받지 못하여 어깨부가 주동영역이 되어 AD4와 같이 어깨부에서 정의 휨모멘트의 영향을 주는 토압이 발생하였다. AD3는 스프링라인의 우세한 변형으로 인해 천단부 토압처럼 타 라이닝에 비해 작은 값을 나타내었다. 마지막으로 AD1-2는 좌측 어깨부에서 가장 큰 부의 휨모멘트를 나타내었으나, 우측 어깨부 라이닝 토압은 가장 작은 값을 나타내었다. 즉 좌측 어깨에서 부의 휨모멘트가 크기 때문에 우측 어깨부의 작은 수동 반력으로 인해 이 곳의 토압이 작게 나타난 것이다.

스프링라인에서 측정된 토압은 AD1-2를 제외하고 대부분 평균 정지토압계수 0.39 이상의 토압이 발생하였다. 이는 지반과 라이닝의 상호작용에 의한 것으로 스프링라인에서 모두 부의 휨모멘트가 발생한 것과 직접 관련되어 있다. 이를 라이닝 항복비와 비교해보면 토압계는 스프링라인의 우측에 부착했으므로 스프링라인 우측의 항복비와

관련있을 것으로 추정된다. 라이닝 항복비에서 스프링라인 우측의 항복비가 가장 큰 것은 AD3, AD1-1, AD0 순이다. 그러나 실제 AD0가 이론 천단 수직압의 약 0.8배로 가장 큰 값을 나타내었다. 그 다음이 각각 AD3, AD1-1로 측압계수는 약 0.6에 해당된다. AD3는 스프링라인에서 휨모멘트가 가장 크게 나타났지만, 하단이 고정되어 있지 않고, 라이닝 바닥과 지반이 완전히 밀착되지 않아 라이닝 토압이 AD0보다 작게 나온 것으로 추정된다. AD4는 AD2보다 항복비가 작았으나, 측압계수는 각각 0.53, 0.5로 AD4가 약간 크게 나타났다. 한편 AD1-2는 좌측 어깨 배면공동으로 인한 편압의 영향으로 스프링라인의 우측 수동토압이 감소하였다.

인버트는 그 형상이 아치가 아닌 평면이기 때문에 다른 부위에 비해 비교적 큰 변형률, 휨모멘트, 축력이 발생하는 주동영역이다. 그러나 다른 부위에 비해 라이닝 토압이 비교적 작게 나타났다. 예를 들어 이들 중 가장 큰 AD4 일지라도 수직압의 0.15배 밖에 되지 않는다. 또한 특이한 점은 g가 상승함에 따라 라이닝 토압이 둔화되거나 심지어 감소하였다. 이는 인버트가 천단부처럼 주동영역이긴 하지만 지반과 라이닝이 밀착되지 못하고 분리되면서 인버트 토압이 감소한 것으로 추정된다. 하지만 만일 인버트 하단이 지반 팽창으로 융기되어 발생한 주동영역이라면 인버트 토압은 크게 증가할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 원심모형실험(centrifuge test)을 실시하여 토피고가 터널 높이의 3배($C/D=3$)에 구축된 다양한 터널 라이닝의 역학적 거동을 규명하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 평균 상대밀도 86% 주문진 표준사의 자중에 의한 정지토압계수는 0.3-0.5 사이로 나타났으며, 평균 0.39로 확인되었다. 이는 Jacky가 제안한 사질토 지반내 정지토압계수 추정결과와 일치하는 값이다. 또한 지표침하는 용기 중심부에서 멀어질수록 작게 나타났다.

2) 주 변형률값으로부터 유추해 볼 때 모든 라이닝은 지반 자중에 의해 타원형으로 변화하였다. 천단 내벽에서는 인장, 외벽에서는 압축변형을 일으켜 자유면을 향한 정의 휨모멘트가 발생하였으며, 스프링라인 내벽에서는 압축, 외벽에서는 인장변형이 발생하여 지반을 향한 부의 휨모멘트가 발생하였다. 어깨부와 각부는 천단과 스프링라인의 중간지점으로 상호 영향을 받는 것으로 나타났다.

절대적인 변형 및 휨모멘트, 축력은 인버트에서 가장 크게 발생하였다.

3) 천단부 배면공동이 존재할 경우(AD1-1), 어깨부는 천단과 동일하게 정의 휨모멘트와 압축력을 나타내었다. 천단부 변형은 배면공동의 영향으로 크지 않은 값을 나타내었는데, 이러한 영향은 스프링라인에도 전달되어 표준형에 비해 휨모멘트는 작고, 축력은 크게 나타났다. 어깨부에 배면공동이 존재할 경우(AD1-2), 비대칭 하중 경향이 나타나 특히 인버트의 변형률이 많이 감소하였다. 특히 좌측 어깨부에서는 배면공동의 영향으로 항복모멘트의 96%, AD0의 18배에 해당하는 높은 부의 휨모멘트를 나타내었다. 이로 인해 좌측 어깨부의 축력은 초반에는 압축을 보이다 80 g 이상에서 인장 축력이 우세하였다.

4) 천단 두께부족의 경우(AD2) 천단부의 휨모멘트비와 축력비가 모형중 가장 크게 나타났다. AD2의 천단 항복 휨모멘트비는 AD0에 비해 1.8배 증가하였으며, 축력은 모든 구간에서 압축력을 나타내었다. 무인버트 AD3는 스프링라인과 각부에서 타모형에 비해 큰 휨모멘트를 나타내었다. 특히 스프링라인에서는 항복모멘트의 약 2배, AD0의 1.5배에 해당하는 부의 휨모멘트가 발생하였다. 측벽 결합 AD4는 결합부분이 새로운 하중 지점이 되어 어깨부에서도 정의 휨모멘트가 발생하였다. 또한 라이닝이 완전한 일체화 거동을 하지 않아 스프링라인의 휨모멘트가 표준 AD0에 보다 작게 나타났다. 결합부위에서의 휨모멘트는 초기에 지반을 향한 부의 방향으로 급증하지만, 하중이 증가할수록 지반에 의한 반력이 점차 생성되어 휨모멘트의 증가율이 둔화된다.

5) 알루미늄 라이닝의 휨모멘트와 축력을 단면 응력으로 환산한 결과, 라이닝 내외면의 응력상태를 구현할 수 있으며, 일반적으로 천단에서는 인장현상을, 스프링라인 이하에서는 압좌현상을 예측할 수 있었다.

6) 라이닝 토압은 단순히 지반 수직하중에 의해 나타나는 것이 아니라 라이닝과의 상호작용에 의한 결과이다. 주동영역인 천단부와 수동영역인 스프링라인이 균열이 발생하지 않는 범위 내에서 지반과 일체화 거동을 하여 토압에 영향을 주었다.

사 사

본 연구는 (주)대우건설기술연구소의 지원 아래 1997년 11월부터 1998년 10월까지 이루어졌으며 연구수행과정에서 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 깊이 감사하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 1996, 터널표준시방서, 구미서관, 186p.
2. Atkinson, J.H., Potts, D.M., Schofield, A.N., 1977, Centrifugal model tests on shallow tunnels in sand, *Tunnels & Tunnelling*, Jan, pp. 59-64.
3. Kimura, M., Mair, R.J., 1981, Centrifugal testing of model tunnels in soft clay, 10th Int. Conf. on Soil Mechanis and Foundation Eng. pp. 319-322.
4. Konig D., Gutter, U., & Jessberger, H.L., 1991, Stress redistribution during tunnel and shaft constructions, Proc. Int. Conf. Centrifuge 91, pp. 129-135.
5. Chambon, P., and Corte, J.F., 1994, Shallow Tunnels in Cohesionless Soil : Stability of Tunnel Face, *Journal of Geotechnical Eng.* Vol. 120, No. 7, pp. 1148-1165.
6. Onoue, A., Kazama, H., Hotta, H., Kimura, T. and Takemura J., 1994, Behavior of stacked-drift-type tunnels, Proc. Int. Conf. Centrifuge 94, Balkema, Rotterdam, pp. 687-692.
7. Guttler, U., and Stoffers, U., 1988, Investigation of the deformation and collapse behavior of circular lined tunnels in centrifuge model tests, *Centrifuges in soil mechanics*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 183-186.
8. Eisenstein, Z. and Negro, A., 1990, Integrated design method for shallow tunnels in soft ground, Proc. JTA Tunnel Symposium, Tokyo Japan, March 27-29, pp. 1-34.
9. Duddeck, H. and Erdmann, J., 1985, On structural design models for tunnels in soft soil, *Underground Space*, Vol. 9, pp. 246-259.
10. ITA Working Group, Guidelines for the design of tunnels, 1988, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 3 No. 3, pp. 237-249.
11. 박중배, 김유석, 김성준, 정한중, 1997, 지반공학에 있어서의 Centrifuge 모형실험, *대우건설기술보*.
12. Taylor, R.N., 1995, *Geotechnical centrifuge technology*, Chapman & Hall, 296p.